外乱オブザーバを用いた多自由度ロボット鉗子の力覚検知に関する研究

二木, 智之 / FUTATSUGI, Tomoyuki

(出版者 / Publisher)
法政大学大学院理工学・工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)
法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編 / 法政大学大学院紀要. 理工学・工学研究科編

(巻 / Volume)
55

(開始ページ / Start Page)
1

(終了ページ / End Page)
8

(発行年 / Year)
2014-03-24

(URL)
https://doi.org/10.15002/00010372

外乱オブザーバを用いた多自由度ロボット鉗子の力覚検知に関する研究

STUDY ON FORCE DETECTION OF MULTI-DEGREES-OF-FREEDOM ROBOTIC FORCEPS USING A DISTURBANCE OBSERVER

二木智之
Tomoyuki FUTATSUGI
指導教員　石井千春

法政大学大学院工学研究科機械工学専攻修士課程

Recently, laparoscopic surgery using robotic support systems has been performed. In such a surgery, force feedback is in demand. However, insertion of an electrical sensor into human body should be avoided due to a medical safety reason. In this study, sensorless estimation method of a disturbance force of robotic forceps based on disturbance observer is proposed. First, a multi-DOF robotic forceps, termed DSD forceps, is modeled as two link mechanism with constraints, and equation of motion is derived using the Lagrange multiplier method. Second, the derived equation of motion with disturbance force is rewritten as augmented multi-input multi-output (MIMO) state space equation, and disturbance observer is constructed to estimate the disturbance force. Finally, simulations are carried out to verify the proposed method.

Key Words *: DSD mechanism, Lagrange multiplier method, Disturbance observer*

１． 緒論

近年，外科手術の技術が向上し，内視鏡外科手術と呼ばれる手術法が普及している．内視鏡外科手術とは，低侵襲外科手術の一つで，体内に内視鏡や鉗子などの器具を挿入し，内視鏡で撮影している映像をモニター越しに見ながら行う手術法である．この手術法は患者の身体へ与える負担が小さい，手術痕が目立ちにくい，術後の回復が早いといった利点がある．しかし一方で，術野が狭い，専用の鉗子の自由度が低いといった欠点があり，医師にとって高度な技量が必要となる手術法でもある．

また，この手術法の発展とともに様々な手術支援システムが開発されている．文献[1]では独自に開発したDouble-Screw-Drive(以下 DSD)機構という屈曲機構を有する多自由度ロボット鉗子(DSD 鉗子)を用いた遠隔操作システムを開発し，文献[2]にてその遠隔操作システムに対して，時変の通信時間遅れに対して制御系の安定性を保証するバイラテラル制御則を提案し, 2 自由度の屈曲動作に対するバイラテラル制御を実現させている．筆者は文献[3]にて，DSD 機構に改良を加え(新 DSD 機構)，半球面の表面をなぞるのみであった DSD 鉗子の先端の可動領域を半球面の内外へと拡張した．しかし，力覚情報を取得する際にひずみゲージを用いているため，患者の体内へ挿入することを考慮すると，鉗子先端部に電気式センサを取り付ける事は回避すべきである．

一方，センサレスで力覚情報を取得する状況においては，現代制御理論におけるオブザーバ，その中でも特に外乱オブザーバを用いて状態推定を行うという手法が有効である．オブザーバはある動的システムにおいて測定不可能な状態量を，そのシステムの数式モデルに基づいて状態を推定するものである．外乱オブザーバはシステムの外部よりかかる外乱(反力)をそのシステムの状態の一部として推定するオブザーバであり，ロボット制御の分野を中心に幅広く使われている(文献[4]・[5])．

また，現代制御理論における外乱オブザーバはシステムの状態方程式の導出が必要となる．状態方程式の導出には様々な手法がある．新 DSD 機構や文献[6]の様に，拘束条件を含むリンク機構に対しては，拘束条件付きラグランジュ方程式を用いることが有効である．これにより，制御対象に存在する拘束条件を加味した状態方程式を導出できる．

本研究では，新 DSD 機構を 2 リンク機構へとモデル化し，拘束条件付きラグランジュ方程式により機構の状態方程式の導出を行う．また，その状態方程式を用いて多入力多出系のシステムに対する外乱オブザーバを構成し，外乱を推定するシミュレーションを行う事を目標とする．

２．Double-Screw-Drive 機構

DSD 機構を搭載した多自由度ロボット鉗子(DSD 鉗子)の概要を Fig.1 に示す.

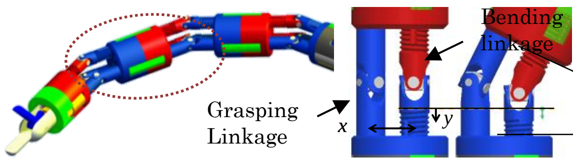
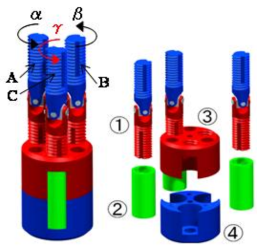


Fig.1 DSD forceps

DSD 機構は 2 本の屈曲リンク(Bending Linkage)と 1 本の把持リンク(Grasping linkage)からなる機構である．屈曲リンクの両端とプレート部には右ネジと左ネジの加工が施され，屈曲リンクが回転することによって DSD 機構の屈曲が実現される(Fig.1 右図). DSD 機構は Fig.1 左図において楕円で囲まれたモジュール単位で構成されており， 1 モジュールにつき，±30 度の屈曲角度を実現できる．DSD 鉗子はこのモジュールが 3 個連結されて構成されており，±90 度の屈曲角度を実現できるようになっている.

また，DSD 機構に改良を加えた新 DSD 機構の概要図を Fig.2 に示す.



①Universal Joint for Bending
②Spline
③Left Handed Screw Plate
④Right Handed Screw Plate

Fig.2 Details of New DSD mechanism

新 DSD 機構では，把持部の回転に用いていた把持リンクが屈曲リンクに変更されている．これにより，1 モジュールにつき±30 度の屈曲動作に加え，最大で±2.8mm の伸縮動作が可能となっている．また，全方位屈曲を行うには 2 本の屈曲リンクを駆動すればよいので，新 DSD 機構では Fig.3 に示すように，全方位屈曲を行う際の領域を 120 度毎の 3 つの領域に分割する事が出来る．①の領域ではリンク B と C を用い，②の領域ではリンク A と B を用い，③の領域ではリンク A と C を用いて屈曲動作を実現する．すなわち，1 つの領域に有効な制御則は，他の 2 つの領域にも有効な制御則として適用可能となるといった特徴を有する．なお，伸縮動作に関しては 3 本の屈曲リンクを同時に同一量動かす制御を行うことで実現される.

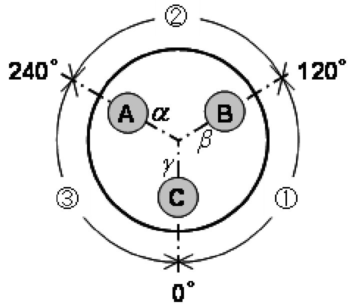


Fig.3 Segmentation by the angle

３．新 DSD 機構の状態方程式の導出

（１）新 DSD 機構のモデル化

前章で示した通り，新 DSD 機構の屈曲動作は 2 本の屈曲リンクを用いることで実現可能であり，その制御則は Fig.3 に示す 3 領域において共通で利用することができる特徴を有する．この特徴は運動方程式の導出にも同様に適用することができるため, 1 領域における 2 本の駆動リンク間の状態方程式を導出することで他の 2 領域における状態方程式を導くことができる．そこで新 DSD 機構を Fig.4 のような 2 本の駆動リンクが中央の従動リンクによって拘束されているリンク機構としてモデル化を行う.

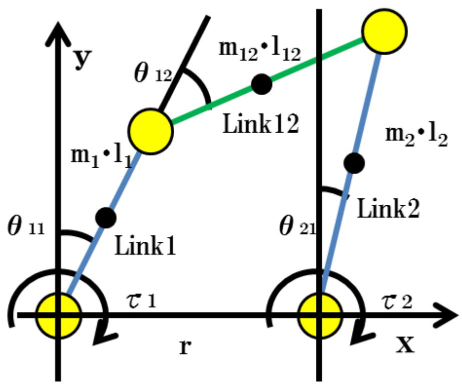


Fig.4 Model of simplified DSD mechanism

Fig.4 における各パラメータを次のように与える.

l_i: リンクiの全長[mm]

r: リンク 1・2 間の距離[mm]

m_i: リンクiの質量[mg]

I_i: リンクiの慣性モーメント[J]

θ_{11}: リンク 1 と y 軸のなす角[rad]

θ_{12}: リンク 1 とリンク 12 のなす角[rad]

θ_{21}: リンク 2 と y 軸のなす角[rad]

τ_i: リンクiに対する駆動力[Nm]

このとき，各リンクの重心の座標を(x_i, y_i)とし，運動エネルギ及び位置エネルギをK_i，U_iとする．これらには次の関係が成り立つ.

$$
\begin{cases}
x_1 = \dfrac{1}{2} l_1 \sin\theta_{11} \\
x_{12} = l_1 \sin\theta_{11} + \dfrac{1}{2} l_{12} \sin(\theta_{11}+\theta_{12}) \\
x_2 = \dfrac{1}{2} l_2 \sin\theta_{21} + r \\
y_1 = \dfrac{1}{2} l_1 \cos\theta_{11} \\
y_{12} = l_1 \cos\theta_{11} + \dfrac{1}{2} l_{12} \cos(\theta_{11}+\theta_{12}) \\
y_2 = \dfrac{1}{2} l_2 \cos\theta_{21}
\end{cases} \tag{1}
$$

$$
\begin{cases}
K_1 = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{4} m_1 l_1^2 \dot\theta_{11}^2 + I_1 \dot\theta_{11}^2\right) \\
K_{12} = \dfrac{1}{2}\{m_{12} l_1^2 \dot\theta_{11}^2 + \\
\qquad m_{12} l_1 l_{12} \dot\theta_{11}(\dot\theta_{11}+\dot\theta_{12})\cos\theta_{12} + \\
\qquad \dfrac{1}{4}(m_{12} l_{12}^2 + I_{12})(\dot\theta_{11}+\dot\theta_{12})^2\} \\
K_2 = \dfrac{1}{2}\left(\dfrac{1}{4} m_2 l_2^2 \dot\theta_{21}^2 + I_2 \dot\theta_{21}^2\right)
\end{cases} \tag{2}
$$

$$
\begin{cases}
U_1 = \dfrac{1}{2} m_1 g l_1 \cos\theta_{11} \\
U_{12} = m_{12} g \left\{ l_1 \cos\theta_{11} + \dfrac{1}{2} l_{12} \cos(\theta_{11}+\theta_{12}) \right\} \\
U_2 = \dfrac{1}{2} m_2 g l_2 \cos\theta_{21}
\end{cases} \tag{3}
$$

また，このリンクモデルのリンク 1 とリンク 2 はリンク 12 によって拘束されており，その運動は次の拘束条件式によって制限される．

$$
\boldsymbol{f} = [f_x \quad f_y]^T \tag{4}
$$

$$
\begin{cases}
f_x : l_1 \sin\theta_{11} + l_{12} \sin(\theta_{11}+\theta_{12}) - l_2 \sin\theta_{21} - r = 0 \\
f_y : l_1 \cos\theta_{11} + l_{12} \cos(\theta_{12}+\theta_{21}) - l_2 \cos\theta_{21} = 0
\end{cases} \tag{5}
$$

（２）拘束条件付きラグランジュ方程式

拘束条件付きラグランジュ方程式を式(6)に示す．

$$
\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\theta}}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\theta}} + \frac{\partial C}{\partial \dot{\boldsymbol{\theta}}} = \tau + \boldsymbol{E\lambda} \tag{6}
$$

ここで，各項は次式で表される．

$$
\begin{cases}
L = (K_1 + K_{12} + K_2) - (U_1 + U_{12} + U_2) \\
\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_{12} & 0 \\ 0 & 0 & d_2 \end{bmatrix} \\
\boldsymbol{\theta} = [\theta_{11}\ \theta_{12}\ \theta_{21}]^T \\
\boldsymbol{\tau} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T \\
\boldsymbol{\lambda} = [\lambda_1 \quad \lambda_2]^T \\
\boldsymbol{E} = \dfrac{\partial \boldsymbol{f}}{\partial \boldsymbol{\theta}} = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial f_x}{\partial \theta_{11}} & \dfrac{\partial f_x}{\partial \theta_{12}} & \dfrac{\partial f_x}{\partial \theta_{21}} \\ \dfrac{\partial f_y}{\partial \theta_{11}} & \dfrac{\partial f_y}{\partial \theta_{12}} & \dfrac{\partial f_y}{\partial \theta_{21}} \end{bmatrix}
\end{cases} \tag{7}
$$

なお，d_iは各リンクの粘性係数，λは拘束力を表す．
以上の式より各リンクの運動方程式を求めることができる．式(8)～(10)にその結果を示す．

●リンク 1

$$
\begin{aligned}
&\left(\frac{1}{4} m_1 l_1^2 + m_{12} l_1^2 cos\theta_{12} + \frac{1}{2} m_{12} l_{12} + I_1 + 2I_2\right)\ddot\theta_{11} \\
&\quad + \left(\frac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} cos\theta_{12} + \frac{1}{2} m_{12} l_{12}^2 + 2I_{12}\right)\ddot\theta_{12} \\
&\quad - m_{12} l_1 l_{12} \dot\theta_{12}\left(\dot\theta_{11} - \frac{1}{2}\dot\theta_{12}\right) sin\theta_{12} - \frac{1}{2} m_1 g l_1 sin\theta_{11} \\
&\quad - m_{12} g \left\{ l_1 sin\theta_{11} + \frac{1}{2} l_{12} \sin(\theta_{11}+\theta_{12}) \right\} + d_1 \dot\theta_{11} \\
&\quad = \tau_1 + \frac{\partial f_x}{\partial \theta_{11}} + \frac{\partial f_y}{\partial \theta_{11}}
\end{aligned} \tag{8}
$$

●リンク 12

$$
\begin{aligned}
&\left(\frac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} cos\theta_{12} + \frac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12}\right)\ddot\theta_{11} \\
&\quad + \left(\frac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12}\right)\ddot\theta_{12} - \frac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \dot\theta_{11} \dot\theta_{12} sin\theta_{12} \\
&\quad - \frac{1}{2} m_{12} g l_{12} sin(\theta_{11}+\theta_{12}) + d_2 \dot\theta_{12} \\
&\quad = \frac{\partial f_x}{\partial \theta_{12}} + \frac{\partial f_y}{\partial \theta_{12}}
\end{aligned} \tag{9}
$$

●リンク 2

$$
\begin{aligned}
&\left(\frac{1}{4} m_2 l_2^2 + I_2\right)\ddot\theta_{21} - \frac{1}{2} m_2 g l_2 sin\theta_{21} + d_3 \dot\theta_{21} \\
&\quad = \tau_2 + \frac{\partial f_x}{\partial \theta_{21}} + \frac{\partial f_y}{\partial \theta_{21}}
\end{aligned} \tag{10}
$$

ここで，I_iは各リンクの慣性モーメントを表す．式(8)～(10)に行列表現を用いると，次式のように書くことができる．

$$
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta})\ddot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{E\lambda} + \boldsymbol{H\tau} \tag{11}
$$

ここで，

$$
\boldsymbol{M}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \tag{12}
$$

$$
\boldsymbol{C} = [C_1 \quad C_2 \quad C_3]^T \tag{13}
$$

$$\boldsymbol{D} = \begin{bmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{G} = [G_1 \quad G_2 \quad G_3]^T \tag{15}$$

$$\boldsymbol{E} = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \end{bmatrix}^T \tag{16}$$

$$\boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \tag{17}$$

であり，各行列成分は次の通りである．

$$\begin{cases} M_{11} = \dfrac{1}{4} m_1 l_1^2 + m_{12} l_1^2 l_1^2 \cos\theta_{12} \\ \qquad + \dfrac{1}{2} m_{12} l_{12} + I_1 + 2I_{12} \\ M_{12} = \dfrac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \cos\theta_{12} + \dfrac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\ M_{13} = 0 \\ M_{21} = \dfrac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \cos\theta_{12} + \dfrac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\ M_{22} = \dfrac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\ M_{23} = 0 \\ M_{31} = 0 \\ M_{32} = 0 \\ M_{33} = \dfrac{1}{4} m_2 l_2^2 + I_2 \end{cases} \tag{18}$$

$$\begin{cases} C_1 = -m_{12} l_1 l_{12} \dot{\theta}_{12} \left(\dot{\theta}_{11} + \dfrac{1}{2} \dot{\theta}_{12} \right) \sin\theta_{12} \\ C_2 = -\dfrac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \dot{\theta}_{11} \dot{\theta}_{12} \sin\theta_{12} \\ C_3 = 0 \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} G_1 = \left(-\dfrac{1}{2} m_1 g l_1 - m_{12} g l_1 \right) \sin\theta_{11} \\ \qquad -\dfrac{1}{2} m_{12} g l_{12} \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ G_2 = -\dfrac{1}{2} m_{12} g l_{12} \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ G_3 = -\dfrac{1}{2} m_2 g l_2 \sin\theta_{21} \end{cases} \tag{21}$$

$$\begin{cases} E_{11} = l_1 \cos\theta_{11} + l_{12} \cos(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ E_{12} = l_{12} \cos(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ E_{13} = -l_2 \cos\theta_{21} \\ E_{21} = -l_1 \sin\theta_{11} - l_{12} \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ E_{22} = -l_{12} \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) \\ E_{23} = l_2 \sin\theta_{21} \end{cases} \tag{22}$$

このとき，

$$\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) = -\boldsymbol{C}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{D}\dot{\boldsymbol{\theta}} - \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\theta}) \tag{23}$$

と置き，次式に式変形する．

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{\theta}} = \boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{E}\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{H}\boldsymbol{\tau} \tag{24}$$

また，拘束力$\boldsymbol{\lambda}$は次式で表すことができる．

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\lambda} = &-\left(\boldsymbol{E}^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{E}\right)^{-1} \boldsymbol{E}^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \left(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) + \boldsymbol{\tau}\right) \\ &-\left(\boldsymbol{E}^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{E}\right)^{-1} \left(\frac{d}{dt} \boldsymbol{E}^T\right) \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \tag{25}$$

式(24)と式(25)より，

$$\begin{aligned} \ddot{\boldsymbol{\theta}} = &\boldsymbol{M}^{-1} \left[\boldsymbol{I} - \boldsymbol{E}\left(\boldsymbol{E}^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{E}\right)^{-1} \boldsymbol{E} \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \right] \left(\boldsymbol{J}(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}) - \boldsymbol{\tau}\right) \\ &-\boldsymbol{M}^{-1} \boldsymbol{E} \left(\boldsymbol{E}^T \boldsymbol{M}^{-1}(\boldsymbol{\theta}) \boldsymbol{E}\right)^{-1} \left(\frac{d}{dt} \boldsymbol{E}^T\right) \dot{\boldsymbol{\theta}} \end{aligned} \tag{26}$$

となり，拘束力$\boldsymbol{\lambda}$を含まない形で$\ddot{\boldsymbol{\theta}}$を表すことができる．

（３）運動方程式の線形化

前節より，拘束力$\boldsymbol{\lambda}$を含まない形で$\ddot{\boldsymbol{\theta}}$を求めることが可能となった．しかしながら，式(26)には非線形要素を多分に含んでおり，このまま扱うのは困難であるため，本研究では式(26)を動作点周りで線形化した線形モデルを取り扱う．新 DSD 鉗子の最大屈曲角度は 90°であるが，1 モジュールあたりの最大屈曲角度は 30°であるので，線形モデルは有効であると考える．

新 DSD 機構の動作点を真直状態とし，

$\boldsymbol{\theta} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{2}\pi & 0 \end{bmatrix}$の近傍で$\sin\theta_i$，$\cos\theta_i$および

$\sin(\theta_{11} + \theta_{12})$，$\cos(\theta_{11} + \theta_{12})$に対し 1 次近似を行うと，

$$\begin{cases} \sin\theta_{11} \cong \theta_{11} = \bar{\theta}_{11} \\ \sin\theta_{12} \cong 1 \\ \sin\theta_{21} \cong \theta_{21} = \bar{\theta}_{21} \\ \cos\theta_{11} \cong 1 \\ \cos\theta_{12} \cong -\theta_{12} = \bar{\theta}_{12} \\ \cos\theta_{21} \cong 1 \\ \sin(\theta_{11} + \theta_{12}) \cong 1 \\ \cos(\theta_{11} + \theta_{12}) \cong -(\theta_{11} + \theta_{12}) = (\bar{\theta}_{11} + \bar{\theta}_{12}) \end{cases} \tag{27}$$

となる．以上から，式(18)～(22)は次のように一次近似される．

$$
\begin{cases}
M_{11} = \frac{1}{4} m_1 l_1^2 - m_{12} l_1^2 \bar{\theta}_{12} + I_1 + 2I_{12} \\
M_{12} = -\frac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \bar{\theta}_{12} + \frac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\
M_{13} = 0 \\
M_{21} = -\frac{1}{2} m_{12} l_1 l_{12} \bar{\theta}_{12} + \frac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\
M_{22} = \frac{1}{4} m_{12} l_{12}^2 + I_{12} \\
M_{23} = 0 \\
M_{31} = 0 \\
M_{32} = 0 \\
M_{33} = \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + I_2
\end{cases}
\tag{28}
$$

$$
\begin{cases}
G_1 = -\frac{1}{2} m_1 g l_1 \bar{\theta}_{11} + m_{12} g l_1 \bar{\theta}_{11} - \frac{1}{2} m_{12} g l_{12} \\
G_2 = -\frac{1}{2} m_{12} g l_{12} \\
G_3 = \frac{1}{2} m_2 g l_2 \bar{\theta}_{21}
\end{cases}
\tag{29}
$$

$$
\begin{cases}
E_{11} = l_1 - l_{12}\bar{\theta}_{11} - l_{12}\bar{\theta}_{12} \\
E_{12} = -l_{12}\bar{\theta}_{11} - l_{12}\bar{\theta}_{12} \\
E_{13} = -l_2 \\
E_{21} = l_2\bar{\theta}_{11} - l_{12} \\
E_{22} = -l_{12} \\
E_{23} = -l_2\bar{\theta}_{21}
\end{cases}
\tag{30}
$$

C行列に関しては$\bar{\theta}$に関する高次の微小項が存在するため一次近似は 0 として省略する．この時，各行列には$\bar{\theta}$を含む項と定数項が混在しているため，以下の処理を行う．
1) $m_{12} = 0$とする．
2)$\boldsymbol{E}$行列に対し再び一次近似を行う
3)$\boldsymbol{\theta} = [\theta_{11} \quad \theta_{21}]^T$とし，必要な行列要素のみを抽出する．
なお，1)の処理は，本研究においてリンク 12 はリンク 1 とリンク 2 の運動を拘束するためのリンクであり，その質量は考慮しなくてもよい．3)の処理は，本研究において導きたい関係式はリンク 1 とリンク 2 の関係式であるため，この処理を行っても支障はないものと考える．上記処理により，各行列および行列成分は次式のようになる．

$$
\boldsymbol{M_l} = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} m_1 l_1^2 + I_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{4} m_2 l_2^2 + I_2 \end{bmatrix}
\tag{31}
$$

$$
\boldsymbol{G_l} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} m_1 g l_1 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} m_2 g l_2 \end{bmatrix}
\tag{32}
$$

$$
\boldsymbol{E_l} = \begin{bmatrix} l_{11} & -l_{12} \\ -l_2 & 0 \end{bmatrix}
\tag{33}
$$

以上より，式(26)は次式のように線形化される．

$$
\boldsymbol{M_l}\ddot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} = \left[\boldsymbol{I} - \boldsymbol{E_l}\left(\boldsymbol{E_l^T}\ \boldsymbol{M_l^{-1}}\ \boldsymbol{E_l}\right)^{-1}\boldsymbol{E_l^T}\boldsymbol{M_l^{-1}}\right]\left(-\boldsymbol{D}\dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} - \boldsymbol{G_l}\bar{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{H\tau}\right)
\tag{34}
$$

（４）状態方程式の導出

式(34)に対し，

$$
\boldsymbol{N_l} = \left[\boldsymbol{I} - \boldsymbol{E_l}\left(\boldsymbol{E_l}^{\boldsymbol{T}}\boldsymbol{M_l^{-1}}\boldsymbol{E_l}\right)^{\boldsymbol{-1}}\boldsymbol{E_l^T}\boldsymbol{M_l^{-1}}\right]
\tag{35}
$$

なる変換をし，さらに式変形を行うと次式となる．

$$
\ddot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} = -\boldsymbol{M_l^{-1}N_lD}\dot{\bar{\boldsymbol{\theta}}} - \boldsymbol{M_l^{-1}N_lG_l}\bar{\boldsymbol{\theta}} + \boldsymbol{M_l^{-1}N_lH\tau}
\tag{36}
$$

上式を用いて状態方程式の導出を行う．状態変数$\boldsymbol{x}$を，

$$
\boldsymbol{x} = [\bar{\theta}_{11} \quad \bar{\theta}_{21} \quad \dot{\bar{\theta}}_{11} \quad \dot{\bar{\theta}}_{21}]^T
\tag{37}
$$

とする．式(36)を状態空間表現で表すと，

$$
\dot{\boldsymbol{x}} = \boldsymbol{Ax} + \boldsymbol{Bu}
\tag{38}
$$

となる．また，(38)式に対する出力ベクトル$\boldsymbol{y}$並びに出力方程式を次式の様に設定する．

$$
\boldsymbol{y} = [y_1 \quad y_2]^T
\tag{39}
$$

$$
\boldsymbol{y} = \boldsymbol{Cx}
\tag{40}
$$

ただし，

$$
\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z_2} & \boldsymbol{I_2} \\ -\boldsymbol{M_l^{-1}N_lG_l} & -\boldsymbol{M_l^{-1}N_lD} \end{bmatrix}
\tag{41}
$$

$$
\boldsymbol{B} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Z_2} \\ \boldsymbol{M_l^{-1}N_lH} \end{bmatrix}
\tag{42}
$$

$$
\boldsymbol{u} = [\tau_1 \quad \tau_2]^T
\tag{43}
$$

$$
\boldsymbol{Z_2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}
\tag{44}
$$

$$
\boldsymbol{I_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}
\tag{45}
$$

$$
\boldsymbol{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}
\tag{46}
$$

である．ここで，式(38)に対し，次の変換行列を用いて行列変換を行う．

$$\boldsymbol{T}=\begin{bmatrix}1&0&0&0\\0&0&1&0\\0&1&0&0\\0&0&0&1\end{bmatrix} \tag{47}$$

これより，(38)式および，(39)は次式で表される．

$$\begin{cases}\dot{\widetilde{\boldsymbol{x}}}=\widetilde{\boldsymbol{A}}\widetilde{\boldsymbol{x}}+\widetilde{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=\widetilde{\boldsymbol{C}}\widetilde{\boldsymbol{x}}\end{cases} \tag{48}$$

ただし，

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{x}=\begin{bmatrix}\bar{\theta}_{11} & \dot{\bar{\theta}}_{11} & \bar{\theta}_{21} & \dot{\bar{\theta}}_{21}\end{bmatrix}^T \tag{49}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{A}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{A}\boldsymbol{T}^{-1}=\begin{bmatrix}\tilde{A}_{11}&\tilde{A}_{12}&\tilde{A}_{13}&\tilde{A}_{14}\\ \tilde{A}_{21}&\tilde{A}_{22}&\tilde{A}_{23}&\tilde{A}_{24}\\ \tilde{A}_{31}&\tilde{A}_{32}&\tilde{A}_{33}&\tilde{A}_{34}\\ \tilde{A}_{41}&\tilde{A}_{42}&\tilde{A}_{43}&\tilde{A}_{44}\end{bmatrix} \tag{50}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{B}}=\boldsymbol{T}\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix}\tilde{B}_{11}&\tilde{B}_{12}\\ \tilde{B}_{21}&\tilde{B}_{22}\\ \tilde{B}_{31}&\tilde{B}_{32}\\ \tilde{B}_{41}&\tilde{B}_{42}\end{bmatrix} \tag{51}$$

$$\widetilde{\boldsymbol{C}}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{T}^{-1}=\begin{bmatrix}\tilde{C}_{11}&\tilde{C}_{12}&\tilde{C}_{13}&\tilde{C}_{14}\\ \tilde{C}_{21}&\tilde{C}_{22}&\tilde{C}_{23}&\tilde{C}_{24}\end{bmatrix} \tag{52}$$

このとき，各行列の要素は次の通りである．

$$\begin{cases}\tilde{A}_{11}=\tilde{A}_{13}=\tilde{A}_{14}=\tilde{A}_{23}=\tilde{A}_{24}=\tilde{A}_{31}=\tilde{A}_{32}=\tilde{A}_{33}=0\\ \tilde{A}_{12}=\tilde{A}_{34}=1\\ \tilde{A}_{21}=\dfrac{2gl_1m_1(l_{12}^2-l_2^2)}{l_2^2(m_1l_1^2+4I_1)}\\ \tilde{A}_{22}=\dfrac{4d_1(l_{12}^2-l_2^2)}{l_2^2(m_1l_2+4I_1)(m_2l_2^2+4I_2)}\\ \tilde{A}_{41}=\dfrac{2gl_1^2m_1(l_{12}-l_2)(m_1l_1^2l_{12}^2+4I_1l_{12}^2+m_2l_2^4+4I_2l_2^2)}{l_{12}^2l_2^2(m_1l_2+4I_1)(m_2l_2^2+4I_2)}\\ \tilde{A}_{42}=\dfrac{4d_1l_1(l_{12}-l_2)(m_1l_1^2l_{12}^2+4I_1l_{12}^2+m_2l_2^4+4I_2l_2^2)}{l_{12}^2l_2^2(m_1l_2+4I_1)(m_{2l_2^2}+4I_2)}\\ \tilde{A}_{43}=-\dfrac{2gl_2m_2(l_{12}^2-l_2^2)}{l_{12}^2(m_2l_2^2+4I_2)}\\ \tilde{A}_{44}=-\dfrac{4d_2(l_{12}^2-l_2^2)}{l_{12}^2(m_2l_2^2+4I_2)}\end{cases} \tag{53}$$

$$\begin{cases}\tilde{B}_{11}=\tilde{B}_{12}=\tilde{B}_{22}=\tilde{B}_{31}=\tilde{B}_{32}=0\\ \tilde{B}_{21}=-\dfrac{4(l_{12}^2-l_2^2)}{l_2^2(m_1l_1^2+4I_1)}\\ \tilde{B}_{41}=-\dfrac{4l_1(l_{12}-l_2)(m_1l_1^2l_{12}^2+4I_1l_{12}^2+m_2l_2^4+4I_2l_2^2)}{l_{12}^2l_2^2(m_1l_1^2+4I_1)(m_2l_2^2+4I_2)}\\ \tilde{B}_{42}=\dfrac{4(l_{12}^2-l_2^2)}{l_{12}^2(m_2l_2^2+4I_2)}\end{cases} \tag{54}$$

$$\begin{cases}\tilde{C}_{12}=\tilde{C}_{13}=\tilde{C}_{14}=\tilde{C}_{21}=\tilde{C}_{22}=\tilde{C}_{24}=0\\ \tilde{C}_{11}=\tilde{C}_{23}=1\end{cases} \tag{55}$$

これより，1 領域における 2 本の駆動リンク間の状態方程式が導出された．

４．外乱オブザーバ

（１）同一次元オブザーバ

同一次元オブザーバとは，n 次元のシステム

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases} \tag{56}$$

において，状態変数$\boldsymbol{x}$を観測できない時に，出力変数$\boldsymbol{y}$および入力変数$\boldsymbol{u}$を用いて状態変数を推測するシステムのことであり，一般には次のように表される．

$$\dot{\hat{\boldsymbol{x}}}=(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{k}\boldsymbol{C})\hat{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{k}\boldsymbol{y}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u} \tag{57}$$

ここで$\boldsymbol{k}$はオブザーバゲインを表す．オブザーバによる状態推定誤差の収束速度は，$(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{k}\boldsymbol{C})$の極が複素平面の左側に位置するほど速い．また，オブザーバの極は対$(\boldsymbol{C},\boldsymbol{A})$が可観測であれば，任意に配置することができる．

（２）最小次元オブザーバ

同一次元オブザーバでは実際のシステムにおいて，センサ等を用いて測定可能な状態変数も含めて推測を行なっているため冗長性を持つ．最小次元オブザーバは測定不可能な状態変数のみを対象として推定を行うオブザーバである．最小次元オブザーバおよび状態変数の推定値は式(58)，(59)で表される．

$$\dot{\hat{\boldsymbol{w}}}=\hat{\boldsymbol{A}}\hat{\boldsymbol{w}}+\hat{\boldsymbol{B}}\boldsymbol{u}+\hat{\boldsymbol{H}}\boldsymbol{y} \tag{58}$$

$$\hat{\boldsymbol{x}}=\hat{\boldsymbol{C}}\hat{\boldsymbol{w}}+\hat{\boldsymbol{D}}\boldsymbol{y} \tag{59}$$

（３）外乱オブザーバ

外乱オブザーバは，システムに侵入する外乱(反力)をシステムの状態の一部として推定するものである．システムに外部から測定不可能な外乱が加わった場合でも，推定した外力を用いて状態を補正したりすることが可能となる．システムに外乱が加わる場合の状態方程式を式(60)に示す．

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{A}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{B}\boldsymbol{u}+\boldsymbol{D}\boldsymbol{w}\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{C}\boldsymbol{x}\end{cases} \tag{60}$$

このとき，wは外乱，Dは外乱の侵入経路を表す．ここで，状態変数xを次のように定義する．

$$\widetilde{\boldsymbol{x}}=[\boldsymbol{x}\quad \boldsymbol{w}]^T \tag{61}$$

次に，外乱のダイナミクスを次式のように近似する．

$$\dot{\boldsymbol{w}}=0 \tag{62}$$

一般に，外乱オブザーバの推定速度は推定すべき外乱の変化に比べて速くなるように設定を行うので，この近似は妥当であると考えられる．式(60)，(61)より，外乱をシステムの状態に含めると次の拡張系を得る．

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{D} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{62}$$

式(57)は，測定不可能な外乱wを有するシステムであるので，このシステムを基にオブザーバを構成することで外乱wを推定するオブザーバが実現されることになる．

５． シミュレーション

（１）シミュレーションモデル

a）リンクモデル

シミュレーションに用いるリンクモデルの状態方程式と出力方程式については 2 章にて導出した式(38)・(40)を用いる．

また，リンクモデルにおける各パラメータを Table 1 に示す．

Table 1 Parameters of the link model

$l_1 \cdot l_2$	Length of the bending linkage	0.019[m]
l_{12}	Distance between the links	0.0052[m]
$m_1 \cdot m_2$	Weight of the bending linkage	1[g]
$d_1 \cdot d_2$	Viscosity coefficient	0[-]
g	Gravitational acceleration	9.8[m/s^2]

b）外乱の侵入経路の設定

外乱オブザーバを構成するにあたり，リンク機構へ加わる外乱並びに外乱の侵入経路を設定する．Fig.4 に示すリンク機構の先端部に外乱Fが加わると考えれば，トルクとモーメントの関係より，

$$M_i = l_i F \tag{63}$$

であるため，

$$d_i w = l_i F \tag{64}$$

と設定する．また，外乱は Link1 と Link2 へ等しく加わるため，(65)式の様に拡張を行う．

$$\boldsymbol{dw} = \begin{bmatrix} l_1 & 0 \\ 0 & l_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F \\ F \end{bmatrix} \tag{65}$$

c）外乱項を含む状態変数システムの導出

前項にて設定した外乱項を状態変数ベクトルに含め次式の拡張系へ再構成する．

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{d} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \boldsymbol{B} \\ 0 \end{bmatrix} \boldsymbol{u} \\ \boldsymbol{y} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{C} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{w} \end{bmatrix} \end{cases} \tag{66}$$

各行列成分は(53)～(55)式，(65)式に示した通りである．

（２）外乱オブザーバによる外乱推定

a）外乱オブザーバの構成

前節にて再構成した状態変数システムに対し，外乱オブザーバを構成する．構成した制御系のブロック線図を Fig.5 に示す．ここで，$\boldsymbol{A}$，$\boldsymbol{B}$，$\boldsymbol{C}$行列の拡大系を$\hat{\boldsymbol{A}}$，$\hat{\boldsymbol{B}}$，$\hat{\boldsymbol{C}}$行列とした．

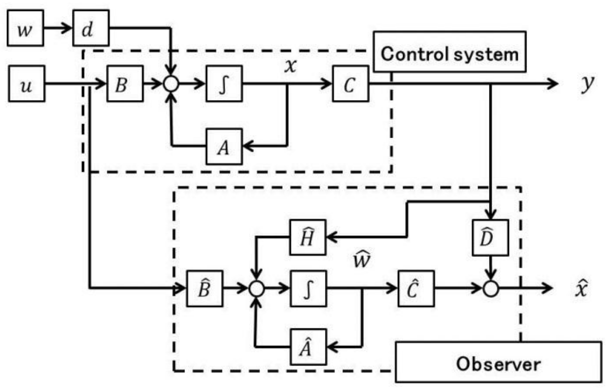


Fig.5 Block diagram

b）ステップ入力の推定

本研究では，リンク機構モデルに対する外乱推定を行うにあたり，2 種類の外乱入力を考えた．

ここでは，各リンクが 0.67[Nm]の駆動トルクで回転運動を行っているものとする．また，動作開始 3 秒後に外乱として 0.1[Nm]のステップ入力を与え，オブザーバによる外乱推定のシミュレーションを行った．

c）シミュレーション結果

動作開始 3 秒後にステップ入力を与えた場合の外乱，その推定結果を Fig.6 に示す．結果より，各リンクにおける外乱推定が良好に行われている事が確認できる．

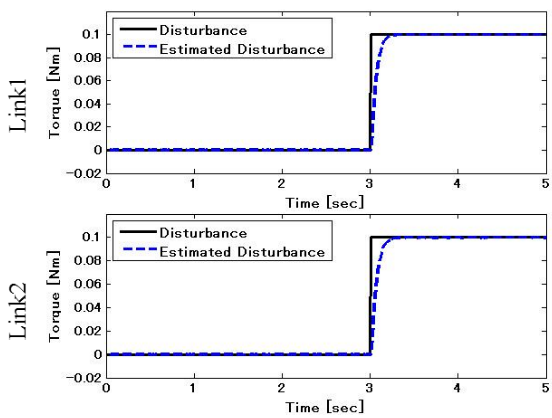


Fig.6 Simulation results (step disturbance)

d）パルス入力の推定

動作開始 1.5 秒後に 0.1[Nm], 3 秒後に 0.3[Nm]のパルス入力を与え，オブザーバによる外乱推定のシミュレーションを行った．その他の条件についてはステップ入力の推定と同様である．

e）シミュレーション結果

動作開始 1.5 秒後，3 秒後にパルス入力を与えた場合の外乱，その推定結果を Fig.7 に示す．ステップ入力の推定同様，各リンクにおける外乱推定が良好に行われている事が確認できる．

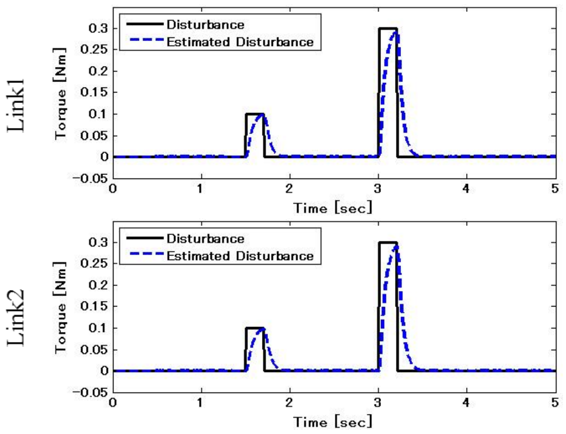


Fig.7 Simulation results (pulse disturbance)

f）考察

2 種類のシミュレーション結果より, 外乱オブザーバによる外乱推定が良好に行われている事が確認できた．特にステップ入力の様に継続して加わり続ける外乱に対しては非常に安定して外乱の推定が行われている事が確認できる．一方で，パルス入力の様な短い時間で加わる外乱に対しては外乱推定がやや遅れている．推定速度を早くする方法としては，オブザーバを構成する際，オブザーバの極を複素平面のより左側に配置する方法がある．しかし，オブザーバの推定速度を早くした場合，微細な外乱に対しても過敏に反応したり，オーバーシュートが発生してしまったりする可能性があるため，一概に推定速度を早くする事が外乱推定の精度を高める事にはならない．Fig.7 に示した結果では，0.2 秒程度で外乱推定が行われているため，それらを考慮すると妥当な推定速度であると考えられる．

また，拘束条件を考慮しないモデルを用いて外乱オブザーバを構成し，d)項と同様の条件で外乱推定のシミュレーションを行ったところ，パルス入力に対して外乱の推定値は変化したが，その推定値は非常に大きく，正常に外乱推定が行われているとは言えない結果となった．これより，DSD 機構での外乱推定には，本研究にて導出を行った拘束条件を考慮したモデルの状態方程式を用いて外乱オブザーバを構成する事が有効であると考えられる．

６． 結論

本研究では，新 DSD 機構を簡単な 2 リンク機構へモデル化を行い，ラグランジュ方程式より状態方程式を導出した．また，その状態方程式を用いて多入力多出力系のシステムに対する外乱オブザーバを構成し, 2 種類の外乱入力に対するシミュレーションを行い，いずれも良好に外乱推定が行われている事を確認した．また，拘束条件を考慮しないモデルを用いた場合の外乱推定の結果との比較を行い，本研究にて導出した状態方程式を用いて外乱推定を行うことが有効である事を確認した．本研究にて導出した理論を 3 次元方向へ拡張することで，新 DSD 機構における押付力並びに力覚センサを排した屈曲力の検知を実現することが可能となると考えられる．

謝辞：本研究を行うにあたり，担当教員の石井千春教授から研究方針や理論等において，豊富な経験から的確なご意見，ご助言を賜ったことを記し感謝の意を表する．

参考文献

1)石井千春，小林宏輔，他，DOUBLE-SCREW-DRIVE 機構を用いた低侵襲手術用多自由度ロボット鉗子，日本機械学会論文集 C 編，Vol.76, No.771, p.3042-3050, 2010

2)三上央晋，石井千春，西谷要介，疋田光孝，橋本洋志，DSD 鉗子の遠隔操作システムに対する２自由度力フィードバック制御，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会, p.1891-1894, 2010

3)二木智之，石井千春，Double-Screw-Drive 機構を用いた多自由度ロボット鉗子の動作領域の拡張，日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012

4)大西公平，外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール，日本ロボット学会誌 Vol.11，No.4, p.486-493, 1993

5)梅野孝治，外乱オブザーバに基づく車両状態量推定，豊田中央研究所 R&D レビュー, Vol.29, No.4, p.23-32, 1994

6)有本卓，宮崎文夫，二足歩行ロボットの階層制御，日本ロボット学会誌，Vol.1, No.3, p.167-175, 1983